

気象レーダによる桜島火山噴煙の観測

Weather Radar Observations of Sakurajima Volcanic Smoke

真木雅之⁽¹⁾・井口正人・藤田英輔⁽²⁾・三輪学央⁽²⁾・前坂剛⁽²⁾・出世ゆかり⁽²⁾・
小園誠史⁽³⁾・桃谷哲也⁽⁴⁾・山路昭彦⁽⁴⁾

Masayuki MAKI⁽¹⁾, Masato IGUCHI, Eisuke FUJITA⁽²⁾, Takahiro MIWA⁽²⁾, Takeshi MAESAKA⁽²⁾, Yukari SHUSSE⁽²⁾, Tomofumi KOZONO⁽³⁾, Tatsuya MOMOTANI⁽⁴⁾ and Akihiko YAMAJI⁽⁴⁾

- (1) 鹿児島大学地域防災教育研究センター
- (2) 防災科学技術研究所
- (3) 東北大学大学院
- (4) 一般財団法人日本気象協会

- (1) Research and Education Center for Natural Hazards, Kagoshima University, Japan
- (2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
- (3) Graduate school, Tohoku University, Japan
- (4) Japan Weather Agency, Japan

Synopsis

Sakurajima volcano has been active since February 2009. The total number of explosive eruptions was 966 in 2011, which was the highest number in recorded history. Corresponding to volcano activities, the ash accumulation in Kagoshima city increased and total ash amount of $3,500\text{g m}^{-2}$ was recorded at Kagoshima local meteorological observatory. Because the volume of volcanic ash in rural area paralyze public ground transportations such as rail road and highway, fast recovery efforts are required to the railroad company and city government. However, no quantitative volcanic ash fall estimation has been established. The present study focuses on utilization of weather radars for quantitative ash estimation, quantitative ash forecasting, and utilization of crustal movement information for providing ash volume. The knowledge on volcanic ash and algorithm developed by the present study can be applied to any other volcano which is located in operational weather radar observation area.

キーワード: 気象レーダ, 桜島, 火山灰雲, 噴煙

Keywords: weather radar, Sakurajima, volcanic ash cloud, ash smoke

1. はじめに

桜島は、2009年2月以降、爆発的噴火が急増しており、2011年には観測史上最多の966回を記録した。噴火の急増に合わせて、鹿児島市内の降灰量も急増しており、2012年は鹿児島地方気象台における降灰量

が $3,500\text{g/m}^2$ を超えた。鹿児島市街地に降る大量の火山灰（ドカ灰）は、鉄道や道路等の交通機関を麻痺させるなど大きな影響を与えるため、早期の復旧作業が必要となる。噴火後、迅速に復旧作業を進める際、降灰量や火山灰が降り積もった範囲を把握することが重要となるが、現在、リアルタイムに降灰分

布を把握する手段がない。本研究では、通年稼働している気象レーダを用いたリアルタイム降灰量分布情報の開発及び降灰予測の高度化を検討する。

本報告では2014年に行った桜島特別観測から得られた初期解析結果について報告する。第2章では特別観測の概要、使用した観測機器について述べる。第3章では各観測機器による初期解析結果を紹介し、第4章では気象レーダを用いた定量的な降灰量推定式について議論する。第5ではまとめと今後の課題について述べる。

2. 観測の概要

2.1 はじめに

気象レーダが噴煙を捉えることができるかどうかを調べるために、2013年の桜島噴火事例について国交省の現業 Xバンドマルチパラメータレーダ（以降、X-MP レーダ）の観測データを収集した。2014年には高感度・高空間分解能を持つ研究用 Kaバンドドップラーレーダによる噴煙柱の観測、光学式粒径分布測定装置（パーシベル）による降灰粒子地上観測を実施した（Fig. 1 を参照）。レーダ観測データの解釈や定量的降灰量推定式に必要な降灰粒子の粒径分布データや精度検証に必要な地上降灰量のデータはパーシベルや電子天秤を用いて測定した。

Fig. 1 には本研究で使用した観測機器と他の研究機関が実施している観測や現業の気象観測機器も示されている。例えば、小型 Xバンド偏波レーダ、空

港ドップラーレーダ、航空機観測などである。

図には示されていないが、無風時における降灰粒子の終端落下速度は、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で行った降灰粒子の落下実験から求められた。以下、使用した観測機器の概要について述べる。

2.2 Kaバンドドップラーレーダ

このレーダは防災科学技術研究所が 2000 年に降水過程の観測のために整備した研究用レーダである。全国での無線局免許を持ち 4 トン車に搭載されているため、機動的な観測が可能である。レーダの概観と主な仕様をそれぞれ Photo1 と Table 1 に示す。桜島噴煙柱観測のため、本レーダを 2014 年 3 月 29 日から 6 月 8 までの期間、桜島昭和火口から約 3.6km 離れた京都大学防災研究所火山活動研究センターの黒神観測点に設置して連続観測をおこなった。レーダは京都大学のネットワークを介して防災科学技術研究所に接続され、リモートでレーダの操作やデータの転送が可能である。転送されたレーダデータはほぼリアルタイムで処理されレーダ観測画像は web サイトで公開された。

アンテナスキャンモードは噴煙柱の水平断面を観測するための PPI スキャン（仰角 16°）と鉛直構造を観測するための RHI スキャン（方位角 257°, 259°, 261°, 263°）を基本とした。これらの一連のスキャンに要する時間は約 2 分である。観測の空間分解能は火口上空で、レンジ方向 50m, ビーム幅 25m であ

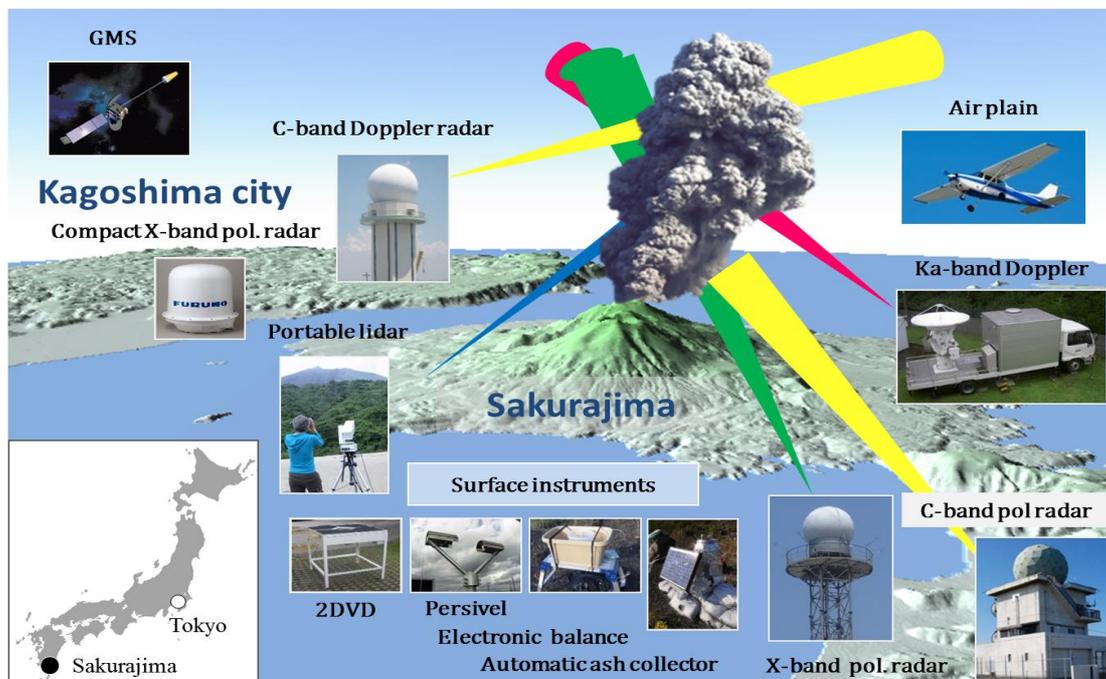


Fig. 1 Instruments used in Sakurajima volcanic ash measurements jointly-conducted with universities and research institutes.

る。取得したデータは反射因子，ドップラー速度，スペクトル幅である。



Photo 1 NIED Ka-band Doppler radar.

Table 1 Main specification of Ka-band Doppler radar.

	specification
Frequency	35.35 GHz
Antenna Type	Cassegrain, 2.1 mφ
Scan Rate	(AZ) Full Circle ≤ 24 deg/s (EL) -2° to +182° ≤ 12 deg/s
Antenna Gain	54.0 dB
Beam Width	0.3°
Transmitter	Magnetron
Peak Power	100 kW
Pulse Length	0.5 μs
PRF	400/4,000 Hz
Polarization	Horizontal
Noise Figure	3.5 dB
Max. Range	30 km
Outputs	Z _H , V, W

2.3 Xバンドマルチパラメータレーダ

国土交通省が桜島の土石流対策として2013年から運用を開始した降雨観測用のXバンド（波長3cm）のマルチパラメータレーダ（偏波レーダとも呼ぶ）である。国交省はこのタイプのレーダ（計39基）を主要都市域に配備し1分毎の降雨情報を配信している。鹿児島では垂水市にレーダが設置されており、半径60km円内の降雨データを取得している（Fig. 2を参照）。

Table 1にレーダの主な仕様を示す。レーダは二重偏波機能を有しており、降雨量や降水粒子の粒径分布の推定に用いられる。アンテナのスキャンはFig.3に示したように仰角1.7°から20.0°までで、計12仰角のPPI観測を行う。5分間でボリュームデータが取得される。ただし、桜島上空ではビームの最高到達高度

が約4kmであることに注意する必要がある。

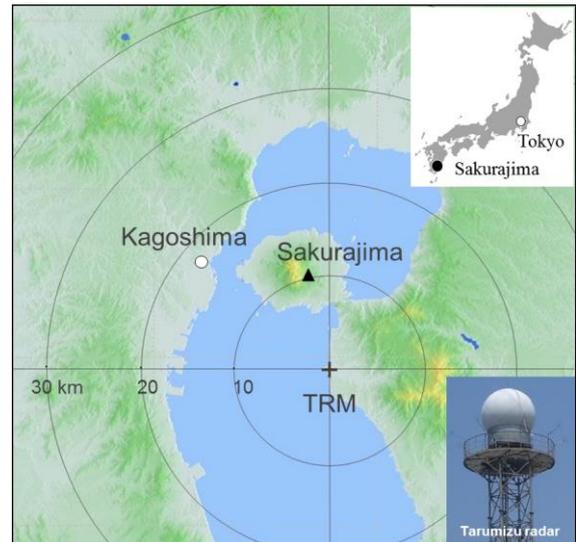


Fig. 2 Location and observation area of X-band polarimetric radar.

Table 2 Main specification of X-band polarimetric radar.

Radar(Name)		TRM (Tarumizu)
Antenna	Size	2.2 m
	Beam width	1.0°
	Gain	44.7 dB (H), 45.1 dB (V)
	Speed	1-4 rpm
Transmitter	Scan angle (PPI)	1.7°- 20.0° (12 tilts)
	Frequency	9770 MHz
	Power	200 W
	PRF	1500/2000 pps
Receiver	Pulse width	1.0 μs
	Smin	-109.5 dBm
Measured radar parameters		Z _H , Z _V , Z _{DR} , Φ _{DP} , ρ _{hv} , Vd, σ
Resolution		Range : 150 m Azimuth : 1.0°

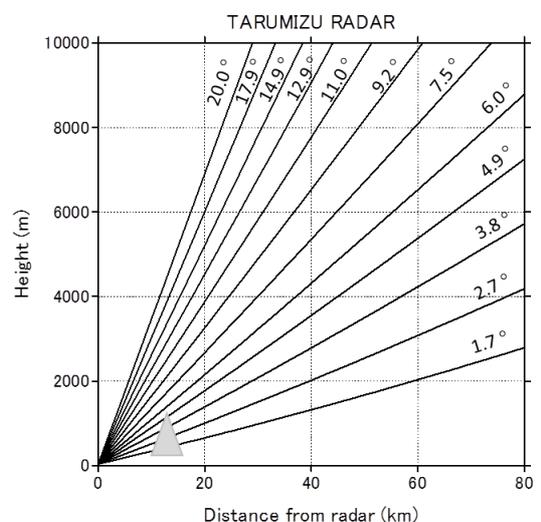


Fig. 3 Antenna scan strategy of X-band polarimetric radar. The triangle shows Sakurajima volcano.

2.4 可搬型偏光ドップラーライダー

三菱電機が、2011年に試作した可搬型偏光ドップラーライダー (portable polarization Doppler lidar) である。試作は、同社の小型ドップラーライダー (亀山ほか, 2004) に、受信光を偏光解消成分と非偏光解消成分に分離する受信回路ユニット及び信号処理用 PC を付加することでおこなわれた。Table 3 に主な仕様を、Photo 2 に桜島有村での噴煙観測の様子を示す。

測定原理は次の通りである。偏光面に直線偏光された送信光は光送受信装置から受信回路ユニット、光アンテナ装置を経て大気中へ放射される。大気中で後方散された受信光は光アンテナ装置を通った後、受信回路ユニットにて送信光の偏光面と同じ成分 (以降、非偏光解消成分) と、直交する成分 (以降、偏光解消成分) とに分光される。その後は、それぞれ独立に信号処理 (スペクル解析) を行い、プロダクト (後方散乱 S/N, 偏光解消度, ドップラー速度, 速度幅) を算出した後、データを蓄積する。偏光解消度 (δ) は、送信光の偏光面に垂直な偏光面を持つ受光成分 (P_s) の送信光の偏光面と同じ偏光面を持つ受光成分 (P_p) に対する比で、

$$\delta = P_s / (P_p - P_s) \quad (1)$$

で定義される。ここで、 δ は垂直成分と水平成分の感度比である。偏光解消度は散乱粒子が球形か非球形かを判定するパラメータで、大気の場合はほぼ 0、黄砂では 0.3~0.7 の値をとる。

このシステムは小型であるため、センサー、信号処理、PCなどを車に搭載し、任意の観測場所へ移動して観測することができる。全ての機器の電源は車のバッテリーから供給が可能である。



Photo 2 Lidar observation of Sakurajima volcanic ash clouds.

Table 3 Main specification of portable polarization

Doppler lidar.	
Specification	
Wavelength	1.54 μ m
Scan	AZ : -90°~+90° EL : 0° ~+90°
Scan speed	A:Z : ~20°/s EL : 1~10°/s
Output	Backscatter S/N, Depolarization Doppler velocity, Spectrum width
Range resolution	30m/75m/150m
Observation range	40m~600m (30m resolution) 75m~1500m (75m resolution) 150m~3000m (150m resolution)
Power	AC100V 400VA
Environment	Antenna : -20~+40°C (W.proof IPX2) Body : 0~+40°C (No W. proof)
Weight	Antenna : 13kg, Body : 30kg

2.5 パーシベル

パーシベル (PARSIVEL) はレーザーを利用した粒度分布測定装置で、降雨等の気象観測に使用されている機器である。OTT社により開発され比較的安価であるという特徴を持つ。使用したパーシベルは改良型で精度の向上が図られている (Photo 3)。Table 4 に主な仕様を示す。

パーシベルには 180mm×30mm の水平平板上のレーザーセンサが設置され (Fig. 4)、降下粒子がそのレーザーセンサを通過した際に発生する電圧降下とその継続時間に基づいて、降下粒子の粒度と落下速度をリアルタイムに測定する。単位体積・単位時間当たりを通過する任意のサイズ区間に含まれる粒子数は以下で計算される。

$$ND_{at} = \frac{n}{v\delta S\delta t\delta d} \quad (2)$$

ここで、 n はあるサイズ区間に含まれる粒子の数、 v は落下速度、 δS はレーザーセンサの面積、 δt は時間区画幅、 δd はサイズ区画幅である。粒度分布はこの ND_{at} をそれぞれのサイズ区間で計算し、組み合わせることで計算される。

Tokay et al. (2014) は、初代のパーシベル、インパクトタイプのディストロメータ (Joss and Waldvogel, 1967)、転倒ます雨量計との比較測定をおこなった。その結果によると、改良型は雨量精度の向上が図られている。また、改良型パーシベルとインパクトタイプのディストロメータの 1 時間平均粒径分布は

0.5 mm と 4 mm の粒径で良く一致した。改良型パーシベルは初代パーシベルに対して、小さなサイズの粒径を正しく測定出来るように改善されている。1mm以下の粒径の落下速度の測定値は文献値と比較して許容できる精度であった。一方、 1ms^{-1} 付近の落下速度の値は過小評価されたが、この傾向は粒径が大きくなると軽減された。



Photo 3 Parsivel set up at Furusato station of Kyoto University in Sakurajima.

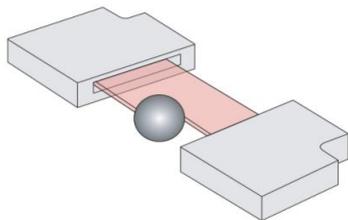


Fig.4 Sensor area of Parsivel.

Table 4 Main specification of Parsivel.

	Specification
Wavelength	780 nm
Transmitter	0.5 mW Laser Class: 1 (21 CFR 1040.10 1040.11) 1 (IEC/EN 60825-1 A2:2001)
Sampling area	180 × 30 mm (54 cm ²)
Target range	Particle size Water drop : 0.2mm~5mm Solid particle : 0.2mm~25mm Fall speed 0.2m/s~20m/s
Sampling time	10 sec~60 min
Power	10~28 VDC (sensor) , 1.5W 12/48 VDC (heater) , 50/100 W

2.6 自動降灰量計

自動降灰量計 (automatic weight measurement system for volcanic ash) は降灰の連続観測を目的として、日本工営 (株) が (独) 土木研究所と共同開発した機器である (小原ほか, 2009 ; 武士ほか, 2010, 田島

ほか, 2011)。2008年から桜島の2カ所で運用が開始され、2014年現在では桜島島内の計18カ所において、測定間隔1時間で連続観測が実施されている。

自動降灰量計の外観を Photo 4 に、原理を Fig. 5 に示す。自動降灰量計の測定部分は、補灰タンク (内径 20cm, 高さ 30 cm の円筒形)、タンク内のフロート式の磁歪式水位センサー、タンクを支えるロードセルから構成される (小原ほか, 2009)。



Photo 4 Automatic weight measurement system for volcanic ash

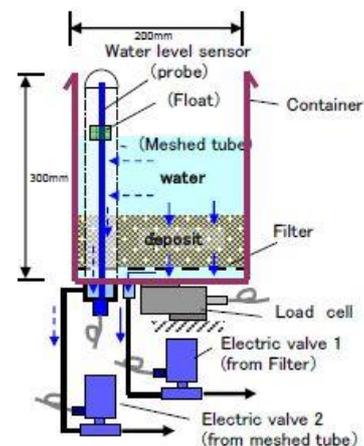


Fig. 5 Principle of Automatic weight measurement system for volcanic ash.

ロードセルで得られた計測質量と水位計で得られた計測水頭位から火山灰堆積質量 (W_s) と堆積厚さ (L) が次式を用いて計算される。

$$W_s = (W - S \cdot D \rho_w) / (1 - \rho_w / \rho_s) \quad (3)$$

$$L = W_s / (S \cdot \rho_d) \quad (4)$$

ここで、 W : タンク内容重量、 S : タンクの開口面積、 D : 水位、 ρ_w : 水の密度、 ρ_s : 火山灰土粒子の密度、 ρ_d : 火山灰層のみかけ堆積密度である。なお、 ρ_s は観測地点周辺の過去に堆積した火山灰の土粒子の測定から桜島の場合、 2.64gcm^{-3} を用いている。また、堆積厚さは火山灰堆積質量 (単位体積質量) 過去に堆積した火山灰層の測定から桜島の場合 1.50gcm^{-3}

の値を用いている。自動降灰量計には2つの自動排水弁が設けられている。一つはフィルター透過用の弁で、設定した時刻に作動し、設定した水頭位まで排水する。排水はタンク内に堆積された火山灰層を通過してタンク底からおこなわれるため、火山灰層の透水係数を求めることができる。もう一つの自動排水弁は水位が一定以上になると水位計底部から排水を行い、水のオーバーフローを防いでいる。これら二種類の排水による水位の変化から降雨量の自動計測が可能である。

電力はソーラーパネルとバッテリーより供給される。データ通信は携帯電話により定時に行われる。測定部下部にはステンレス製の収納箱(30cmの立方形)が設置され、その中にデータロガーやバッテリー、携帯電話などのデータ収録部や電源供給部、通信部等が収納されている。

3. 観測結果

3.1 Kaバンドドップラーレーダ観測

2014年3月29日から6月8までの期間、防災科学技術研究所のKaバンドレーダを桜島昭和火口から約3.6km離れた京大防災研黒神観測所に設置して噴煙柱の観測をおこなった。観測は噴煙柱の水平断面を観測するセクタPPIスキャン(仰角16°)と鉛直構造を観測するセクタRHIスキャン(方位角257°, 259°, 261°, 263°)を基本とした。これら一連の観測に要する時間は約2分である。観測の空間分解能は火口上空で、レンジ方向75m、ビーム幅25mで、反射因子、ドップラー速度、スペクトル幅のデータを取得した。

観測期間中、計77回の噴火(爆発的噴火49回)があった(気象庁による)。このうち、53回の噴火(爆発的噴火35回)のデータを取得した。この中には、噴煙柱高度が火口から4500mに達する2事例と3000mに達する1事例が含まれる。また、降雨や雲に覆われていたために噴煙高度が不明とされた14事例が含まれる。

噴煙柱のレーダ解析結果の例として、2014年5月10日13時7分(気象庁発表)の爆発的噴火のKaバンドレーダ画像を示す(Fig. 6)。噴煙柱の規模は、噴火直後は火口直上で1km程度の幅だったが、10分後には東西2km、南北3kmの大きさに広がっている(PPI画像を参照)。RHI観測からは、噴煙柱の時間変化を捉えることができた。噴火直後は噴煙柱の頂は約18m/sで上昇し、5分後には約9ms⁻¹に減速した。噴煙柱の最大到達高度は海拔高度で約5.1kmであった。

Fig.7(a)に噴火から4分後の噴煙柱の反射因子の鉛

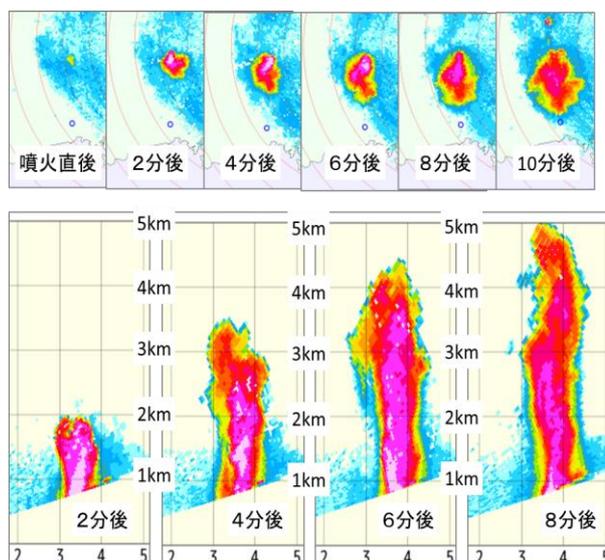


Fig. 6 Time change of Ka-band radar reflectivity of volcanic ash column after explosive eruption. PPI image (above), RHI image (below). 13:07LST, May 10, 2014.

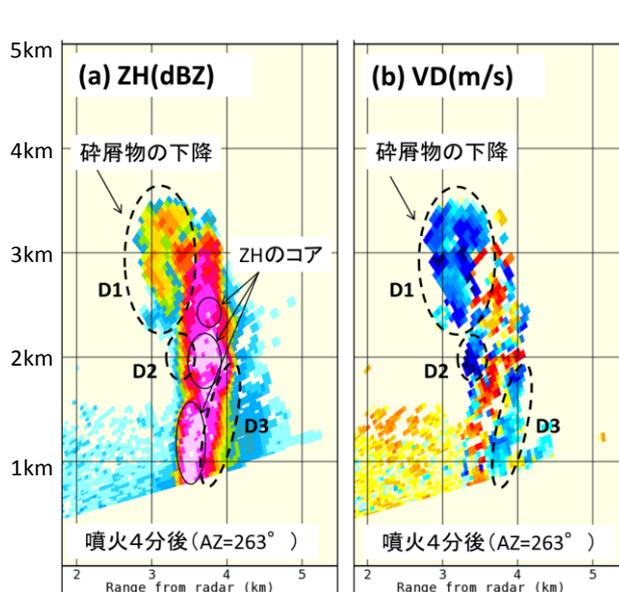


Fig 7. RHI image of (a) Reflectivity ZH (dBZ) and (b) Doppler velocity VD (ms⁻¹) 4 minute after volcanic eruption. 13:11, May 10, 2014.

直分布(噴煙柱の中心の北側部分)を示す。内部は一樣ではなく3箇所ZHのコアが認められる。これらのコア部分は、正のドップラー速度(上昇流)に対応していた(Fig. 7(b))。水平風の影響を無視して推定した上昇速度は約4ms⁻¹であった。一方、負のドップラー速度(下降流)がD1, D2, D3の破線で囲ったエリアで観測された。特にD1では最大で6m/sの下降速度が観測された。D1の反射因子の分布は特徴的で有り碎屑物の落下を反映していると考えられる。噴煙柱が最大高度に達した10分後には一部の高

度を除いて下降流が支配的となった（図省略）。

3.2 Xバンドマルチパラメータレーダ観測

前節と同じ噴火事例について国交省の X バンドマルチパラメータレーダの観測データを解析した。Ka バンドドップラーレーダのような高分解能の解析は出来ないが 5 分間隔の偏波パラメータの 3 次元分布データの解析が可能である。現在、鹿児島大学で開発中の 3 次元解析ツールを用いて求めた 13:12 から 13:55 の 43 分間の鉛直積算反射強度の水平分布と鉛直断面を Fig. 8 に示す。

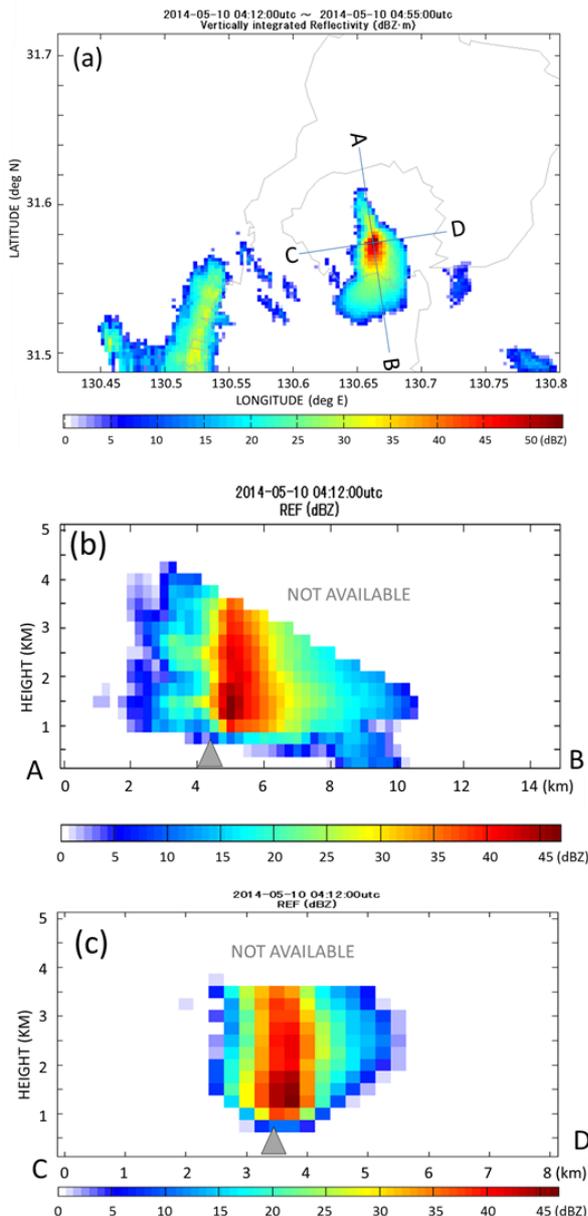


Fig. 8 Vertically integrated reflectivity. (a) Horizontal distributions, (b) vertical cross section along the line A-B, and (c) vertical cross section along the line C-D.

Fig8(a)によると反射強度の積算値は昭和火口か

ら南方向に約 1km 付近で最大となり分布の幅を広げながら海岸から約 5km の海上まで達している。海上では若干、西向きとなっている。A-B 方向の鉛直断面によれば、時間積算反射強度はレーダ設置高度から約 1500m（昭和火口から約 700m）の高度に最大値があることがわかる。C-D 方向の鉛直断面からは、分布の幅は高度約 2500m（火口から約 1700m）で 3.5km と最大の幅となっている。

注意する点として、Fig.8(a)と Fig.8(b)には、昭和火口から北に延びるエコーが現れているが、これはレンジサイドロブに起因する擬似エコーと考えられる。

3.3 自動降灰量計による定量的降灰量推定式

2013 年、噴煙高度が 3000m 以上の桜島噴火事例（計 31 事例）について、X-MP レーダおよび国交省が桜島に展開している自動降灰量計のデータを収集して事例毎の降灰量推定式を求めた。結果はかなりばらつきがあった。解析可能な 6 事例について求めた暫定式は

$$S_A = 1.32 + 0.118 \times S_Z \quad (5)$$

である。ここで、 S_A 、 S_Z はそれぞれ時間積算降灰量、時間積算反射因子（dBZ の単位での積算値であることに注意）である。

3.4 地盤変動観測データによる噴火前降灰量予測

地盤変動の観測データから火山噴出物の量を推定する関係式が提案されている。この関係式は長期間の地上降灰量の観測データを用いて得られた経験式であり、個別の噴火に対しての精度は不明である。そこで、本研究では個々の噴火事例について地殻変動量と X バンドマルチパラメータレーダの反射強度を比較することにより、個々の噴火にも適応できる降灰量推定式を作成中である。2003 年の噴煙高度が 3000m 以上あった各事例について、レーダ反射強度の時間積算値分布を求めた（付録を参照）。今後、地殻変動量との関係を調べ、噴火前降灰量予測式の精度を確認する予定である。

3.5 パーシベルから得られた降灰粒子の落下速度と粒径分布

桜島の複数箇所で火山灰サンプルを採取し、定量的降灰量の推定に必要な火山灰の終端落下速度と粒径分布を測定した。測定には、無風状態と終端速度に達する高さが得られる防災科学技術研究所の大型降雨実験施設を利用した。実験ではパーシベルの他に、2 次元ディストロメータ、電子天秤による同時測定

も行われた。

防災科研・大型降雨実験施設内において、約 16m の高さから火山灰サンプルを落下させ、パーシベルにより火山灰粒子の粒径分布と落下速度を測定した。

実験には桜島で採取された 2 種類の火山灰を用いた。第一はあらかじめ篩掛けを行い粒径毎に分けた試料 13 サンプルである。もう一つは国交省の自動降灰量計設置地点 18 か所で一か月毎に採取された試料(2014 年 2 月, 3 月, 4 月に採取)の 54 サンプルである。計 67 サンプルの火山灰試料について実験を行った。粒径が既知の試料に関しては、一つの試料に対して 3-4 回の落下実験を行い、落下速度の平均値を求めた。

パーシベルの測定データから求めた粒径と落下速度の関係を Fig.9 に示す。べき乗関数を仮定して、最小二乗法から求めた粒径と落下速度の関係式は

$$v = 5.900D^{0.530} \quad (6)$$

であった。上式と先行研究で得られた火山灰の落下速度式(Harris and Rose,1983)を比較したところ、得られた実験式は粒径が 2mm 程度までは Harris and Rose(1983)の測定値と良く合う。また、雨滴粒子関する Atlas et al. (1973)の経験式と比較すると、全体的に落下速度が高くなることが分かった。

本研究による落下速度の式を用いて、粒径既知試料の粒径分布を検証した(三輪ほか, 2015)。得られた粒度分布は、既知の粒径をよく反映していたが、粒径が 0.125-0.25 mm の試料と 0.25-0.5 mm の試料で粒度分布のピークがほぼ同じ粒径に同定された。これは、パーシベルの最小粒径が 0.2mm であることに起因すると考えられる。結論として、粒径 0.20 mm 以上の粒子が多くを占める試料ならば、降下火山灰においてもパーシベルによる粒径分布の解析は有用であると言える。

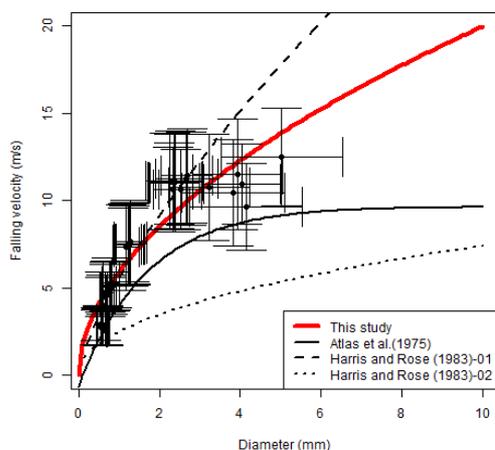


Fig.9 Relationship between the terminal velocity and diameter obtained from Pacivel.

上記の結果は実験室内での解析であるが、噴火時の降灰粒子の観測は、桜島の京都大学防災研究所の古里観測点で行われた。いくつかの噴火事例のデータを取得しており、初期解析結果については本年報で小園ほか(2015)が紹介している。

4. 気象レーダによる定量的降灰量推定

前節では、いわゆる工学的なアプローチによる降灰量推定式の導出を試みた。本章では、降灰粒子の粒径分布情報に基づく理学的なアプローチとして、Maezono et al (2006)を参考に、桜島の降灰量推定式を導出する。なお、実際の観測データの適用は今後の課題とする。

Brown and Wohletz (1995), Marzano et al. (2006)によれば、火山灰の粒径分布は次式で表される。

$$N_a(D) = N_n \left(\frac{D}{D_n} \right)^\mu e^{-\Lambda_n \left(\frac{D}{D_n} \right)^\nu} \quad (7)$$

ここで、 D (mm)は粒子の直径、 D_n (mm)は個数で重み付けられた平均直径、 N_n 、 Λ_n 、 μ は粒径分布を特徴付けるパラメータで、それぞれ切片ファクター、傾きファクター、形状ファクターである。上式は、規格化 Weibull 分布 ($\nu=\mu+1=3\gamma+3$) と規格化 Gamma 分布 ($\nu=1$) の二つに簡略化できる。Brown and Wohletz (1995)によれば、粒子の輸送と成長を考慮した Segmentation-Fragmentation 理論から導き出される粒径分布は Weibull 分布である。実測された火山灰粒子の解析から、規格化 Weibull 分布の場合 $\mu=1$ 、規格化 Gamma 分布では $\mu=0.5$ である。

灰粒子(固体)の密度を ρ_a (g m^{-3})、球相当質量を $m_a=\rho_a(\pi/6)D^3$ とすると火山灰の質量密度 C_a (g m^{-3}) は次式で表される。

$$C_a \equiv 10^{-3} \int_{D_1}^{D_2} m_a(D) N_a(D) dD = \frac{10^{-3} \pi}{6} \rho_a m_3 \quad (8)$$

ここで、 D_1 、 D_2 はそれぞれ最小直径、最大直径(mm)、 m_3 は粒径分布の 3 次モーメントである。個数で重み付けられた平均直径 D_n は次式で表される。

$$D_n = \frac{\int_{D_1}^{D_2} D N_a(D) dD}{\int_{D_1}^{D_2} N_a(D) dD} = \frac{m_1}{m_0} \quad (9)$$

$D_1=0$ 、 $D_2=\infty$ とすると、規格化 Weibull 分布 ($\mu=3\gamma+2$) の粒子分布の場合、

$$m_n = \frac{\left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{3(\gamma+1)} \right) \right]^3 \Gamma \left(1 + \frac{1}{3(\gamma+1)} \right) D_n^{n-3} C_a}{\frac{\pi}{6} \cdot \Gamma \left(\frac{\gamma+2}{\gamma+1} \right) \cdot \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{3(\gamma+1)} \right) \right]^n \rho_a} \quad (10)$$

ここで、 Γ は完全ガンマ関数、 $\gamma=0.5$ (規格化 Weibull 分布 $\mu=0.5$) である。

降灰強度 R_a ($\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$) は次式で表される。降灰強度 R_a の単位を (mmh^{-1}) で表す場合には R_a/ρ_a とすれば良い。

$$\begin{aligned} R_a &\equiv 3.6 \times 10^{-3} \int_{D_2}^{D_1} [v_a(D) - w_{up}] m_a(D) N_a(D) dD \\ &= 3.6 \times 10^{-3} \left[\frac{\pi}{6} a_v \rho_a m_{3+b_v} - w_{up} C_a \right] \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $v_a(D)$ (ms^{-1}) および b_v は空気密度の高度変化を考慮した粒子の落下速度の経験式の係数とべき指数である (Wilson, 1972)。三輪ほか (2015) は大型降雨実験施設での粒径が既知の火山灰粒子の自由落下実験から、 $a_v=5.900 \text{ ms}^{-1}$ 、 $b_v=0.530$ を得た。一方、Harris and Rose (1983) によれば、1982 年の St Helens の噴火では $a_v=5.558 \text{ ms}^{-1}$ 、 $b_v=0.722$ 、1980 年の St Helens 噴火では $a_v=2.504 \text{ ms}^{-1}$ 、 $b_v=0.472$ である。一方、Wilson (1972) によれば高度 5-10km で $a_v=7.460 \text{ ms}^{-1}$ 、 $b_v=1.0$ である。

X バンドの場合の電波の火山灰粒子の減衰は 0.1 dB km^{-1} 程度で無視出来るので、Rayleigh 近似が成り立つとき、レーダ反射因子 Z_H は次式で定義される。

$$Z_H = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_a|^2} \eta_H = \int_{D_1}^{D_2} D^6 N_a(D) dD = m_6 \quad (12)$$

ここで、 η_H はレーダ反射強度、 K_a は複素誘電率ファクター、 λ は波長である。Oguchi et al. (2009) によれば、桜島の火山灰の比誘電率は $\epsilon=5.2729-i0.13239$ で複素誘電率ファクター (dielectric factor) は

$$|K_a|^2 = |(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2)|^2 = 0.2025 \quad (13)$$

である。一方、Marzano et al (2006) は $|K_a|^2 = 0.39$ を用いている。

規格化 Weibull 分布 ($\mu=0.5$) を仮定し、(5)式で $w_{up}=0$ と仮定し、(10)式を(8)式と(11)式に代入して

$$\begin{aligned} C_a &= \left(10^{-3} \frac{\pi \rho_a m_3}{6 m_6} \right) Z_H \cong 3.21 \times 10^{-5} \frac{\rho_a}{D_n^3} Z_H \\ R_a &= \left(3.6 \times 10^{-3} \frac{a_v \pi \rho_a m_{3+b_v}}{6 m_6} \right) Z_H \cong 2.03 \times 10^{-4} \frac{a_v \rho_a}{D_n^{3+b_v}} Z_H \end{aligned} \quad (14)$$

を得る。

Marzano et al. (2006) は、火山灰のタイプを細かな

火山灰 (fine ash), 粗い火山灰 (coarse ash), 礫 (lapilli) の 3 種類に分類し、 $D_n=0.01 \text{ mm}$ (fine ash), $D_n=0.1 \text{ mm}$ (coarse), $D_n=1 \text{ mm}$ (lapilli) としている。本研究でもこの分類に従うとして、次の 3 種類の推定式を得る。

ただし、火山灰粒子の落下速度は三輪ほか (2015)、密度は Oguchi et al. (2009) の桜島での値 ($\rho_a=2.512 \text{ g cm}^{-3}$) を用いる。上式の Z_H は火山灰の反射因子 Z_{Ha} であることに注意する必要がある。通常、気象レーダでは雨滴を仮定して等価レーダ反射因子 Z_{He} を測定する。水の誘電ファクターを 0.93、火山灰の誘電ファクターを 0.20251 とすると、 Z_{Ha} は

$$Z_{Ha} = (0.20251/0.93) Z_{He} = 0.218 Z_{He} \quad (15)$$

から求めることができる。

上記の式を 2014 年 5 月 10 日の噴火事例に適用して降灰量の推定を試みたが、推定結果は D_n の値によって大きく変化した。もっともらしい D_n をいかに推定するかが今後の課題である。付録に示した 2013 年の 31 の噴火事例で得られた偏波パラメータから D_n に関する情報が得られないか解析を進めている。レーダ反射因子と相関係数には篩い分け効果を反映した変化が見い出されており、 D_n の推定に利用できるかもしれない。

5. まとめ

気象レーダによる噴煙量の定量的推定と予測手法の確立のために、研究用 Ka バンドドップラーレーダ、現業 X バンドマルチパラメータレーダ、パーシベルなどの地上測器による観測をおこなった。Ka バンドドップラーレーダ観測からは、噴火直後の噴煙柱の内部構造の変化を捉えることに成功した。更に、火口直上でのドップラー速度の情報から火砕物の噴出速度を推定できることが示唆された。現業用 X バンド気象レーダは定量的降灰量の推定に有力な情報を与えることが確認された。大型降雨実験施設内での火山灰粒子の落下実験や桜島でのパーシベルによる地上観測からはレーダによる定量的降灰量推定に必要な降灰粒子の落下速度や粒径分布に関する知見が得られた。

本報告では触れなかったが、ドップラーライダー観測からは Ka バンドや X バンドでは検出出来ない数十マイクロンの粒子の分布情報が得られている。これらの多波長リモートセンシング観測は噴煙の実態解明に有効である。今後、データの解析を進めていきたい。

謝 辞

桜島におけるレーダをはじめとする計測機器の設置および観測においては、京都大学防災研究所火山活動研究センターの味喜大介氏、NPO 法人桜島ミュージアムの福島大輔氏に多大なるご協力を頂きました。X バンドマルチパラメータレーダのデータや自動降灰量データに関しては国土交通省九州地方整備局から提供を受けました。本研究の遂行にあたって、京都大学防災研究所一般共同研究費（課題番号：25G-11）、防災科学技術研究所運営費交付金、JSPS 科研費 24244069 の助成を受けました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 小原大輔・田島靖久・沼尾信二・下村幸男・田村圭司・山越隆雄・武澤永純・伊藤洋輔（2009）：自動降灰・降雨量計の開発，地球惑星合同学会発表予稿集。
- 亀山俊平・安藤俊行・柳澤隆行・酒巻洋・若山俊夫・平野嘉仁・古田匡・萩尾正廣・藤井康宏（2004）：レーザーによる風の計測—コヒーレントドップラーライダーの各分野への応用—，検査技術，**9**（8），25—29。
- 小園誠・三輪学・真木雅之・前坂 剛・味喜大介・井口正人（2015）：パーシベルによる火山灰の粒径分布の測定，京都大学年報。
- 武士俊也・鶴本慎治郎・下窪和洋・阿蘇修一・松岡 暁・山越隆雄・田村圭司・小原大輔・福田謙太郎・田島靖久，下村幸男（2010）：桜島における自動降灰・降雨量計による連続観測，砂防学会講演予稿集。
- 田島靖久・福田謙太郎・國友優・高橋英一・下窪和洋・阿蘇修一・井口正人（2011）：自動降灰量計によって捉えた桜島のブルカノ式噴火，日本火山学会講演予稿集。
- 三輪学央・真木雅之・小園誠史・藤田英輔・棚田俊收・井口正人（2015）：パーシベルを用いた桜島産火山噴出物の落下速度に関する実験的測定，京都大学防災研究所年報。
- Atlas, D., Srivastava, R. S. and Sekhon, R. S. (1973): Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 11, pp. 1-35.
- Brown, W. K. and Wohletz K. H. (1995): Derivation of the Weibull distribution based on physical principles and its connection to the Rosin-Rammler and lognormal distributions, *J. Appl. Phys.*, vol. 78, No. 4, pp. 2758-2763.
- Harris, D. M. and Rose W. I. (1983): Estimating particle sizes, concentrations and total mass of ash in volcanic clouds using weather radar, *J. Geophys. Res.*, vol. 88, No. C15, pp. 10969-10983.
- Joss, J. and Waldvogel, A. (1967): A spectrograph for the automatic analysis of raindrops, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 68, pp. 240-246.
- Marzano, F. S., Vulpiani, G. and Rose, W. I. (2006): "Microphysical characterization of microwave radar reflectivity due to volcanic ash clouds," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, No. 2, pp. 313-327.
- Oguchi, T., Udagawa, M., Nanba, N., Maki, M. and Ishimine, Y. (2009): Measurements of Dielectric Constant of Volcanic Ash Erupted From Five Volcanoes in Japan *IEEE Trans Geosci. Remote Sensing*, 47(4), pp. 1089-1096.
- Tokay, A., Wolff, D.B. and Petersen, W.A. (2014): Evaluation of the New Version of the Laser-Optical Disdrometer, OTT Parsivel. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31, pp. 1276-1288.
- Wilson, L. (1972): Explosive volcanic eruptions —II: The atmospheric trajectories of pyroclasts, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, vol. 30, No. 2, pp. 381-392.

（論文受理日：2015年6月11日）